

Metodika monotonicke triaxialni zkoušky v rámci hodnocení stmelených a za studena recyklovaných směsí pro podkladní vrstvy vozovek

Číslo výsledku:	TE01020168V063
Aktivita:	Metodika využití monotonicke triaxialni zkoušky pro posuzování směsí recyklace za studena
Autoři výsledku:	Ing. Jan Suda, Ph.D., Ing. Petr Mondschein, Ph.D., Ing. Zuzana Čížková, Ph.D., Ing. Jakub Šedina, Ph.D., Ing. Jan Valentin, Ph.D.
Termín dosažení:	09/2019

Publikace byla zpracována jako hlavní výstup a za podpory projektu výzkumu a vývoje programu Centra kompetence Technologické agentury České republiky č. TE01020168 „Centrum pro efektivní a udržitelnou dopravní infrastrukturu (CESTI)“.

Název: Metodika monotonické triaxiální zkoušky v rámci hodnocení stmelěných a za studena recyklovaných směsí pro podkladní vrstvy vozovek

Hlavní autor: Ing. Jan Suda, Ph.D.

Spoluautoři: Ing. Petr Mondschein, Ph.D., Ing. Zuzana Čížková, Ph.D., Ing. Jakub Šedina, Ph.D., Ing. Jan Valentin, Ph.D.

Recenzenti: Ing. Denisa Cihlářová, Ph.D., katedra dopravního stavitelství, VŠB-TU Ostrava
Ing. Jan David, TPA ČR, s.r.o.
Ing. Zdeněk Komůrka, ředitel Správy a údržby silnic Jihomoravského kraje

Vydání: první, 2020

Počet stran: 24

Jazyková korektura: nebyla provedena.

Vytištěno vlastním nákladem.

© Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7, 166 29 Praha 6

Anotace certifikované metodiky

Autoři:

Ing. Jan Suda, Ph.D., Ing. Petr Mondschein, Ph.D., Ing. Zuzana Čížková, Ph.D., Ing. Jakub Šedina, Ph.D., Ing. Jan Valentin, Ph.D.

Název:

Metodika využití monotonické triaxiální zkoušky pro posuzování směsí recyklace za studena

Abstrakt:

Z hlediska konstrukce vozovky představují podkladní vrstvy tvořené stmelnými (stabilizovanými) zrnitými materiály důležitou mechanickou část celkové konstrukce. Ne vždy je těmto vrstvám věnována dostatečná pozornost a velmi často se spokojíme s ověřením funkčnosti daného materiálu či kompozitu s využitím jednoduchých a časově nenáročných pevnostních zkoušek. Tyto zkoušky však nemohou plně podchytit celkovou výkonnost daného kompozitu a tudíž díky tomu nezískáváme ucelenou informaci o chování daného materiálu v konstrukci vozovky.

Účelem a cílem předkládané metodiky je rozšíření možností charakterizace stmelných (stabilizovaných) materiálů a především pak směsí recyklace za studena využívajících různé systémy pojiv na bázi cementu, asfaltu nebo dalších hydraulicky aktivních látek. Při použití těchto materiálů v konstrukci vozovky sehrává důležitou roli vedle únosnosti či pevnosti též odolnost proti smykovým napětím a celková soudržnost. Tyto charakteristiky však zpravidla nejsou v případě uvedených typů materiálů (kompozitů) sledovány a není jim přikládána dostatečná významnost. Metodika proto vymezuje vhodný zkušební postup, jak aplikovat na tyto typy materiálů obecně známý princip triaxiální zkoušky. Popisuje vlastní postup provedení zkoušky, včetně zajištění potřebných pomůcek, současně shrnuje způsob vyhodnocení získaných dat provedené zkoušky. Tím v plném rozsahu nahrazuje technickou normu, která by jinak specifikovala zkušební postup.

Předkládaná metodika představuje ucelený technický dokument, který vymezuje podmínky a možnosti využití triaxiální zkoušky pro stanovení smykových parametrů zrnitých stabilizovaných materiálů, včetně směsí recyklace za studena v podkladních či případně ložních vrstvách vozovek.

Klíčová slova:

Stabilizované směsi, recyklace za studena, triaxiální zkouška, koheze, úhel vnitřního tření, axiální napětí.

Jazyk:

Čeština

Certifikační orgán:

Ministerstvo dopravy České republiky, Odbor kosmických aktivit a ITS.

Annotation of certified methodology

Authors:

Ing. Jan Suda, Ph.D., Ing. Petr Mondschein, Ph.D., Ing. Zuzana Čížková, Ph.D., Ing. Jakub Šedina, Ph.D., Ing. Jan Valentin, Ph.D.

Title:

Methodology for the utilization of monotonic triaxial test used for valuation of cold recycled mixtures

Abstract:

From the perspective of pavement structures base and sub-base layers realized as bound (stabilized) granular material represent important mechanistic part of the whole pavement structure. Not always gain these layers sufficient attention and importance. Often we are satisfied by verification of functionality of given structural material or composite by using simple, modest and time-not-demanding strength tests. Such tests however cannot fully describe and explain the overall performance of these composites. Therefore we usually do not receive a complex information about the behavior of such material in the pavement structure.

The aim and objective of the submitted methodology is to extend the possible characterization of bound (stabilized) structural pavement materials and especially then cold recycling mixtures which utilize various systems of binders based on cement, bituminous binder or other hydraulically active compounds. If these materials are used in the pavement structure, the resistance to acting shear stresses and overall cohesion play besides bearing capacity and strength properties an important role. These characteristics are, however, usually not considered and tested in case of these types of materials and composites. At the same time they do not usually receive sufficient importance and attention. The methodology therefore defines suitable test procedure and protocol how to apply for these types of materials generally known principles of triaxial tests. The methodology describes the procedure to execute the laboratory test, including the provision of required tools and utilities. At the same time it summarizes the methods how to evaluate gained test data of the executed test. By this the methodology fully replaces a technical standard, which would otherwise define and specify such test procedure.

The submitted methodology represents a complex technical document, which specifies conditions, requirements and possibilities to use triaxial test for determination of shear parameters of granular stabilized materials. This includes also cold recycled mixtures as they are used in base or eventually binder pavement layers.

Keywords:

Stabilized mixtures, cold recycling, triaxial test, cohesion, internal friction angle, axial stress

Language:

Czech

Certification Authority:

Ministry of Transport of the Czech Republic, Department of aerospace activities and ITS.

Obsah

1.	Úvod	6
2.	Mohr – Coulombova teorie	7
3.	Smykové napětí v podkladních vrstvách vozovek	10
4.	Monotonická triaxiální zkouška	11
4.1	Sestava zkušebního zařízení	12
4.2	Zkušební vzorek	13
4.2.1	Výroba zkušebních vzorků	13
4.2.2	Zrání zkušebních vzorků	15
4.3	Průběh zkoušky	15
4.4	Vyhodnocení monotonické triaxiální zkoušky	16
4.5	Protokol o zkoušce	17
5.	Shrnutí zkušebního postupu	19
6.	Srovnání novosti postupů	19
7.	Popis uplatnění certifikované metodiky	20
8.	Ekonomické aspekty	21
9.	Literatura	23

1. Úvod

Hodnocení stmelovaných a stabilizovaných materiálů obecně, včetně pochopení jejich fyzikálně mechanických vlastností, je důležité z hlediska správného návrhu, zpracování a dosažení správné funkce a životnosti ve vozovkovém souvrství. V současnosti se přístupy jednotlivých zemí výrazně liší, přičemž převládá posuzování kvality na základě pevnostních parametrů, které ovšem nerepresentují reálné chování, ani reálné podmínky v konkrétní konstrukci. Jen v omezenější míře je věnována pozornost deformačním parametrům typu modul tuhosti nebo parametrům charakterizující životnost zhutněné vrstvy. Převládá tedy empirický přístup a zjišťování jediné hodnoty zkoumané vlastnosti (zpravidla pevnosti v příčném tahu, tlaku či stanovení kritéria CBR) materiálu za specifikovaných podmínek, tedy při definované jedné konkrétní teplotě, stáří vzorku apod. Rozdíl v návrhovém modulu pružnosti nestmelovaných materiálů a materiálů stmelovaných či stabilizovaných hydraulickými pojivy je poměrně značný. Při porovnání různých konstrukcí vozovek nemá použití stmelené či stabilizované vrstvy s hydraulickým pojivem tak jednoznačný přínos, jak by se mohlo na první pohled zdát, a to s ohledem na rizika spojená s výstavbou a životností takových vrstev a celé konstrukce vozovky (potenciální riziko vzniku reflexních trhlin). Materiály stmelené či stabilizované cementem se také výrazněji liší od materiálů stabilizovaných asfaltovým pojivem. Asfaltové pojivo je používáno ve dvou technologických podobách – asfaltová emulze (kontinuální obalení) a zpěněný asfalt (bodové obalení). Přidáním asfaltu se zvyšuje pružnost vrstvy (vzhledem k porušené a degradované vrstvě), odolnost vůči vodě, do určité míry i odolnosti vůči únavě vlivem opakovaného zatížení. Současně se mírně zvyšuje pevnost v ohybu vlivem visko-elastických vlastností pojiva. Na druhou stranu může být vrstva s použitím asfaltu náchylná k tvorbě trvalých deformací. V neposlední řadě je nutné uvažovat i ekonomické hledisko použití výše zmíněných pojiv. Nicméně aplikace standardních laboratorních zkoušek (pevnost v tlaku a pevnost v příčném tahu) v rámci hodnocení vlivu kombinace pojiv ve stmelovaných či stabilizovaných směsích je problematické, a tyto testy vykazují nemalé distinktivní omezení.

Z hlediska trvanlivosti vyjádřené odolností směsi proti účinkům vody nebo proti kombinovanému účinku vody a mrazu sice byly v některých technických předpisech převzaty postupy tradičních zkoušek používaných u asfaltových směsí nebo směsí stmelovaných hydraulickými pojivy. Nicméně podrobnější ověření platnosti a správnosti takto nastavených zkušebních postupů, pro obecně stmelené směsi s různými typy pojiv, je komplikované především v podobě vybavenosti silničních laboratoří přístroji, potřebným softwarem a proškolenými laboranty [Čížková a kol., 2016].

Monotonická triaxiální zkouška je jednoduchý test, který mohou provádět komerční laboratoře a spolehlivě určovat příslušné vlastnosti materiálu. V tomto smyslu použití

monotonického triaxiálního testu (*simple triaxial test - STT*) představuje krok k vyplnění mezery v podobě jednoduché, rychlé, ekonomické zkoušky, která umožňuje spolehlivě charakterizovat zrnitý materiál stabilizovaný či stmelený hydraulickým nebo asfaltovým pojivem či jejich kombinací. Zároveň je umožněno testovat dostatečně velký reprezentativní vzorek, byť s jistými distinktivními omezeními.

Obecně triaxiální test je uznávanou metodou, která se používá k měření mechanických vlastností, jako je smykové elastické a plastické chování mnoha deformovatelných pevných materiálů, zejména zemin, písků, jílu a dalších zrnitých materiálů.

Použití triaxiální zkoušky má svůj původ v geotechnice. Pro charakterizaci materiálů v konstrukci vozovky je však použití triaxiálního testování méně obvyklé. To je většinou omezené prozatím na výzkumné projekty.

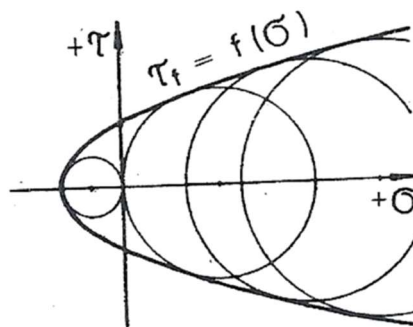
V současnosti je tento typ testu používán například v Jižní Africe v rámci výzkumného pracoviště CSIR a na univerzitě Stellenbosch [Jenkins a kol., 2007, Jenkins a kol., 2004].

2. Mohr – Coulombova teorie

Při triaxiální smykové zkoušce je válcové zkušební těleso zatěžováno ve třech na sebe kolmých směrech. Hlavní axiální (principiální) napětí σ_1 působí ve směru osy zkušebního tělesa tedy ve směru kolmém na podstavu. Boční či plášťové hlavní (principiální) napětí σ_3 , působí kolmo na plášť zkušebního tělesa, má ve všech místech stejnou velikost a simuluje odpor okolního materiálu v konstrukci vozovky proti vyvozovaným deformacím. Podle Mohra dojde k porušení materiálu tehdy, když maximální rozdíl mezi největším tangenciálním napětím (v absolutní hodnotě) a funkcí normálového napětí, charakteristickou pro daný materiál klesne na nulu dle rovnice (1).

$$\max[\max|\tau| - f(\sigma)] = 0 \quad (1)$$

Funkci $f(s)$ určil Mohr experimentálně jako obalovou čáru kružnic napětí odpovídajících stavům na mezi porušení materiálu (viz obrázek 1).



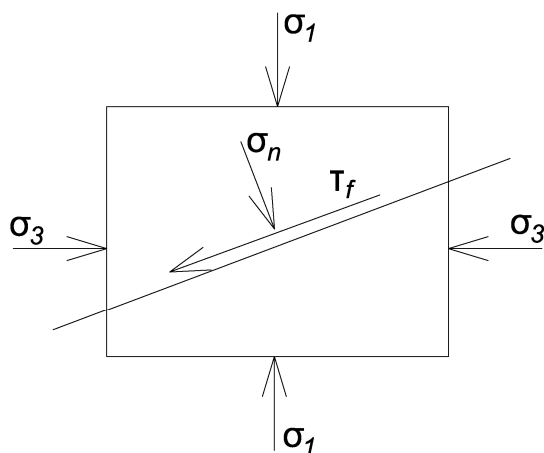
Obrázek 1: Obalová čára kružnic napětí

Funkci lze zjednodušeně považovat za lineární (tzv. Mohr-Coulombovo kritérium) neboť Coulombův vztah je rovnicí přímky (2). Coulombova přímka je obalovou čarou Mohrových kružnic, které znázorňují stav napjatosti na mezi porušení. Pro zvolené napětí σ_3 můžeme najít pouze jednu hodnotu σ_1 , při které dojde k porušení.

Při monotoničtější triaxiální zkoušce je těleso zatěžováno (až do jeho porušení) axiálním hlavním napětím σ_1 , které je vyvozeno konstantním nárůstem síly v čase. Plášťové hlavní napětí σ_3 je během zkoušky nastaveno na konstantní hodnotu pro každý jednotlivý experiment, přičemž tato hodnota je udržována po celou dobu zatěžování zkušební tělesa pomocí tlaku vzduchu v gumové či pryžové buňce. Deviatorické napětí ($\sigma_1 - \sigma_3$) je poloměrem Mohrovy kružnice [Klobouček a kol., 1979]. Mohrovy kružnice slouží ke stanovení kritické kombinace normálového a smykového napětí, při které dojde k porušení zkušební tělesa. K porušení tedy může dojít třemi různými způsoby:

- zvýšením σ_1 ;
- snížením σ_3 ;
- snížením σ_1 a σ_3 současně.

Při vynesení minimálně tří Mohrových kružnic je možné sestavit obalovou křivku (v tomto případě přímku) k těmto kružnicím, která je nazývána jako Mohr-Coulombovo kritérium porušení. Jakákoliv kombinace normálového a smykového napětí, která se nachází nad touto obalovou křivkou, vede k porušení zkušební tělesa (viz obrázek 2)



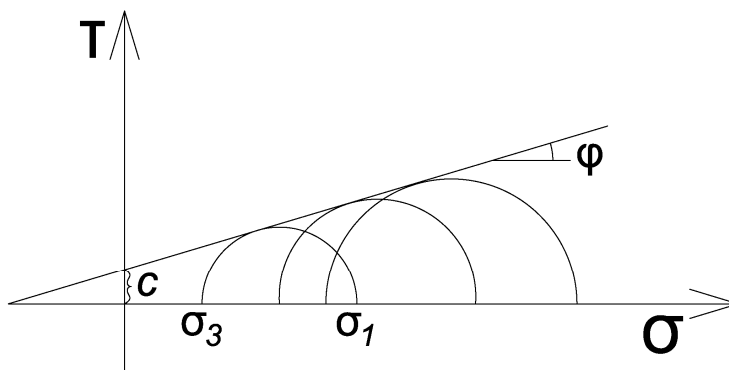
Obrázek 2: Stav napjatosti při triaxiálním namáhání vzorku

Rovnici přímky je možno matematicky vyjádřit následující rovnicí (2):

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (2)$$

Tento matematický vztah známý jako Mohr-Coulombova rovnice slouží k výpočtu smykové pevnosti materiálu z hodnot normálového napětí σ_n , úhlu vnitřního tření φ a soudržnosti c . Smykové parametry φ a c je možné odečíst z Mohrových kružnic, přičemž φ je úhel který

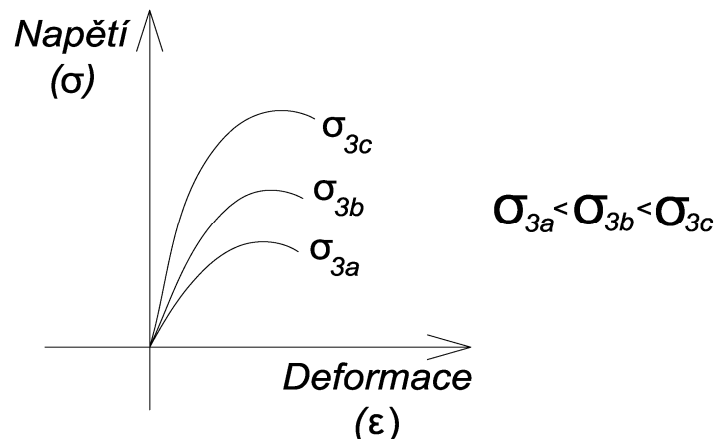
svírá obalová přímka na mezi poručení s vodorovnou osou a c je vzdálenost průsečíku této přímky se svislou osou od počátku souřadnicového systému (viz obrázek 3).



Obrázek 3: Mohr-Coulombovo kritérium poručení v meridiální rovině

Smyková pevnost je u stabilizovaných či stmelovaných směsí významnou vlastností, uvážíme-li zatížení a odezvu materiálu ve vrstvě vozovky. Stmelené či stabilizované vrstvy se totiž svým chováním blíží nestmelovým vrstvám ze zrnitých materiálů, důsledkem čehož je téměř zanedbatelná schopnost přenášet tahové namáhání. Pro vyvinutí schopnosti roznášet zatížení do větší plochy, musí být uvažována smyková pevnost. Pokud bychom měli zjednodušeně vyjádřit význam jednotlivých parametrů, pak soudržnost c je možné si představit jako určitou „lepivost“ materiálu, zatímco ϕ je v podstatě míra odporu ke tření daná především vlastnostmi zrnitého materiálu. Smyková pevnost je pak celkový odpor proti posunu na styku zrn vlivem fyzikálních a chemických vazeb [Jenkins a Mulusa, 2008].

Velikost smykové pevnosti je ovlivněna především zrnitostí materiálu (včetně maximální velikosti zrna), obsahem a vlastnostmi jemných částic a geometrickými vlastnostmi zrn. Dalším ovlivňujícím parametrem je objemová hmotnost, kdy podle [Long a Ventura, 2004] vede vyšší objemová hmotnost zpravidla i k vyšší soudržnosti a úhlu vnitřního tření. Smyková pevnost je kromě toho ovlivněna i velikostí bočního tlaku, což je dobře patrné i z pracovních diagramů zobrazujících průběh napětí a deformace během monotonicke triaxiální zkoušky pro různé úrovně bočního (plášťového) tlaku (viz obrázek 4). Čím větší boční tlak na zkušební těleso působí, tím vyšší sílu dokáže těleso přenést. Posledním důležitým aspektem je vlhkost směsi. Podle [Long a Ventura, 2004] vede vyšší vlhkost ke snížení soudržnosti. Na rozdíl od deviatorického napětí, které je na pórovém tlaku nezávislé, protože voda nepřenáší smyk, je smyková pevnost pórovým tlakem snižována.



Obrázek 4: Pracovní diagram při monotonicke triaxialni zkoušce

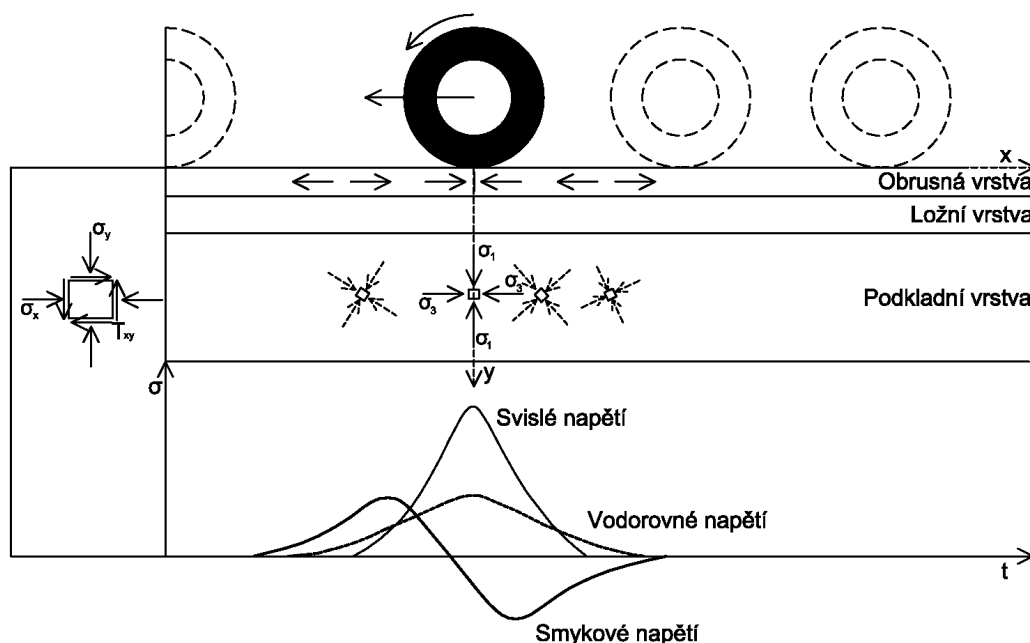
3. Smykové napětí v podkladních vrstvách vozovek

V každé vrstvě se významně uplatňuje namáhání ve smyku, které způsobuje:

- vnitřní tření mezi zrny kameniva, jehož velikost závisí na normálovém napětí (od zatížení vrstvy);
- soudržnost ve smyku vlivem působení pojiva (koheze), která je na normálovém napětí (od zatížení vrstvy) nezávislá.

Stmelené či stabilizované vrstvy mají relativně vysoký modul pružnosti ale nízkou pevnost - jsou „křehké“. Již při malé deformaci vznikají velká napětí a dojde k porušení. Díky relativně nízké pevnosti se porušování odehrává tak, že vzniká velké množství nepatrných trhlinek. Proto jsou laboratorní pevnosti a přetvárné charakteristiky přibližně 10x vyšší než ty, které jsou měřeny na vozovce.

Na rozdíl od konvenčních napěťových drah, které jsou obvykle rozsáhle simulovány prostřednictvím triaxiálních a jednoduchých smykových zkoušek, je prvek nebo element pod pohyblivým zatížením vystaven složitější dráze napětí, jak je znázorněno na obrázku 5. Během jednoho cyklu (pojezdu) zatížení, se působící vertikální namáhání zvyšuje z nuly na maximální hodnotu, následovanou poklesem na nulu. Změny smykového napětí se mění nejen v rozsahu, ale i ve směru najednou, což vede k rotaci hlavních napěťových os. V současném experimentálním zkoumání se však zřídka uvažuje o vazebných účincích mezi principy rotace napětí a úrovně smykového napětí, které ovlivňují především vznik trvalých deformací [Wu a kol. 2017, Eghbali & Fakharian 2014].



Obrázek 5: Rotace hlavních napětí při pojezdu zatěžovacího kola

4. Monotonická triaxiální zkouška

Monotonická triaxiální zkouška, při které jsou stanovovány smykové parametry zrnitých stmelených či stabilizovaných směsí je i přes některé nevýhody pravděpodobně jednou z vhodnějších zkoušek pro klasifikaci tohoto typu materiálu oproti stanovování pevnostních parametrů (pevnost v tlaku, pevnost v příčném tahu), které reprezentují vlastnosti materiálu jen za specifických okrajových podmínek. Jmenované pevnostní testy jsou nenáročné na čas a provedení. Ale pokud se daná směs vyznačuje nízkým podílem asfaltového či hydraulického pojiva, což není u stmelených materiálů v podkladních vrstvách vozovek na škodu, jsou tyto testy hůře uplatnitelné.

Další nesporná výhoda triaxiální zkoušky spočívá ve variabilitě zatěžování, respektive v možnosti simulace působení okolního materiálu, který klade v konstrukci vozovky odpor proti vyvozovaným účinkům cyklických dynamických kolových tlaků. Je vhodné zmínit i možnost využití triaxiálního přístroje pro další typy zkoušek. Jedná se o cyklickou triaxiální zkoušku, při které je zjišťována hodnota modulu pružnosti M_r (v případě krátkodobé zkoušky) nebo sledování vývoje trvalé deformace ϵ_p (v případě dlouhodobé zkoušky). Hlavní praktickou nevýhodou monotonické triaxiální zkoušky je oproti jednoduchým empirickým pevnostním zkouškám její náročnost na výrobu, respektive obtížná manipulace s těžkými zkušebními vzorky a zkušební formou (zkušební těleso váží 12,5 kg, s formou a membránou váží kolem 45 kg). Další nevýhoda je pak spojena se zaváděním každé nové zkoušky – většina laboratoří v České republice není na tuto zkoušku vybavena, což vedle finančních nároků

znamená i jistou neochotu vůči novým přístupům či obměnám ve zkušebnictví. Navíc chybí navázání na návrhovou metodiku, kterou bude nutné dále specifikovat, resp. upravit.

4.1 Sestava zkušebního zařízení

Pro provedení triaxiální zkoušky jsou potřeby následující zařízení a pomůcky:

- Ocelová triaxiální forma (viz obrázek 6), která se skládá z podstavy, uzavíratelného tenkostěnného ocelového pláště, horního nástavce, zatěžovacího disku a upevňovacích šroubů. Uzavíratelný ocelový plášť musí umožňovat snadné umístění zkušební vzorku, vložení pryžové či latexové buňky a zároveň snadné složení či uzavření ocelového pláště. Forma musí být schopná bezpečně vydržet požadované tlaky. Tento set musí být také schopen kompenzovat případné objemové změny vzorku.



Obrázek 6: Ocelová triaxiální zkušební forma

- Pryžová a latexová buňka opatřená vzduchovým ventilem (viz obrázek 7).



Obrázek 7: Pryžová a latexová buňka opatřená vzduchovým ventilem

- Zkušební lis, vyhovující EN 12390-4. Zařízení musí být schopno vyvinout sílu min. 300 kN a minimální posun aktuátoru o 40 mm. Zařízení musí obsahovat snímač posunu, tenzometr a ovládací panel včetně systému pro sběr dat. Zkušební lis musí mít možnost regulovat rychlost deformace aplikované na vzorek ve velkém rozsahu. Dalším požadavkem je přesnost a kontinuita rychlosti deformace nezávisle na zjištěných silách.
- Digitální manometr s přesností $\pm 2,5$ kPa.
- Vzduchový kompresor, jehož minimální provozní tlak, který je schopen vyvinout je větší než 300 kPa.
- Termostaticky regulovaná vodní lázeň nebo vzduchovou komoru se schopností udržovat zvolenou zkušební teplotu s přesností $\pm 0,5^\circ\text{C}$.
- Systémy pro sběr dat musí zaznamenat následující: (i) tlakovou sílu, (ii) svislou deformaci (svislý posun aktuátoru zatížení) a (iii) boční tlak.

4.2 Zkušební vzorek

Pro jednu směs se zhotoví 9 zkušebních těles. Z toho 3 zkušební tělesa pro boční tlak 50 kPa, 3 zkušební tělesa pro boční tlak 100 kPa a 3 zkušební tělesa pro boční tlak 200 kPa.

4.2.1 Výroba zkušebních vzorků

Do silnostěnné rozevíratelné válcové formy (viz obrázek 8) o průměru $d = (150 \pm 1)$ mm a výšce $v = 400-500$ mm se vloží dolní hutnicí píst, příp. i dolní zatěžovací hlavice a následně separační papír. Připraví se navážka m , která se vypočte podle vzorce (3), přičemž podmínkám zkoušky odpovídá množství přibližně 11000 g – 12500 g.

$$m = V \rho \left(1 + \frac{w}{100} \right) \quad (3)$$

kde,

- m** hmotnost zkušební tělesa v g;
V objem zkušební tělesa v cm³;
ρ suchá objemová hmotnost v g/cm³, přičemž suchá laboratorní objemová hmotnost se zjišťuje Proctorovou modifikovanou zkouškou podle ČSN EN 13286-2 při stanovené optimální vlhkosti;
w vlhkost směsi v %.

Na horní stranu formy se nasadí nástavec a forma se postupně plní navážkou za současného předhutňování vhodným dusadlem. Povrch náplně ve formě se srovná a opatří kolečkem filtračního papíru. Potom se osadí horní hutnící píst, na který se umístí zatěžovací hlavice. Těleso musí být zhutněno najednou, respektive je nepřípustné postupné zhutňování na požadovanou výšku zkušební tělesa. Je nutné, aby oba tlačné písky byly pohyblivé. Zkušební těleso se zhutňuje lisováním osovou silou ($88,5 \pm 0,5$) kN (což odpovídá zatěžovacímu napětí zhruba 5,0 MPa) tak, aby oba písky zůstaly při lisování pohyblivé. Při působení síly vlivem dohutňování zkušební vzorku dochází k jejímu poklesu. Proto je nutné opakovaně (obvykle 6 až 8 cyklů) přibližně v půlminutových intervalech osovou sílu stále vyrovnávat na předepsanou hodnotu tak dlouho, dokud pokles osově síly během 30 sec není menší jak 1 kN.



Obrázek 8: Zhutňovací set / silnostěnná rozevratelná ocelová forma / zkušební vzorky

Po skončení hutnění se odstraní obě zatěžovací hlavice, z formy se vyjmou hutnící písky a odstraní se filtrační papír. U směsí stmelených cementem či jiným hydraulickým pojivem a směsí stmelených cementem + asfaltovou emulzí / zpěněným asfaltem se zkušební těleso ponechá ve formě při teplotě (20 ± 2)°C po dobu (24 ± 6) hod. Potom se zkušební těleso z formy vyjme, zváží s přesností ± 1 g a stanoví se jeho průměrná výška a průměr (průměr ze 3 měření) s přesností ± 1 mm. Zhutněné zkušební těleso má mít výšku (300 ± 10) mm [TP 208,

Wirtgen Manual]. Následně se stanoví laboratorní objemová hmotnost podle ČSN EN 12697-6+A1 postup D.

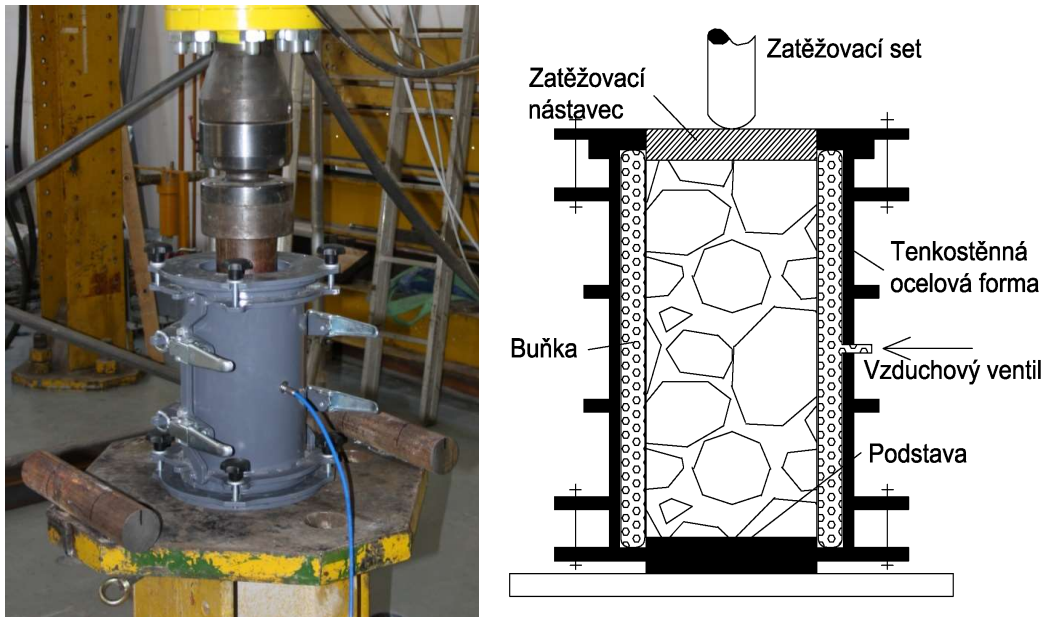
4.2.2 Zrání zkušebních vzorků

Vyrobená zkušební tělesa se u směsí stmelovaných cementem či jiným hydraulickým pojivem uloží při 90-100% vlhkosti při teplotě (20 ± 2) °C. U směsí stmelovaných cementem + asfaltovou emulzí či zpeněným asfaltem další 2 dny uloží při 90-100% vlhkosti při teplotě (20 ± 2) °C. Dále se zkušební tělesa uloží při 40-70% vlhkosti při teplotě (20 ± 2) °C. U směsí stmelovaných asfaltovou emulzí či zpeněným asfaltem se zkušební tělesa uloží na vzduchu při teplotě (20 ± 2) °C.

4.3 Průběh zkoušky

Tento typ testu se provádí za účelem stanovení smykových parametrů: soudržnost C a úhel vnitřního tření ϕ . Monotonická triaxiální zkouška se provádí při teplotě $25,0 \pm 1,0$ °C s řízenou konstantní rychlostí posunu zatěžovacích čelistí 2,1-2,6% výšky zkušební vzorku za minutu. Pro výšku vzorku 300 mm při rychlosti 2,1% tato hodnota odpovídá 6,3 mm/minutu. Zkušební vzorek by měl být před zahájením testu temperován na vzduchu minimálně $12\pm 0,5$ hod. nebo ve vodě $8\pm 0,5$ hod.

Zkušební vzorek se umístí na ocelovou podložku triaxiální formy. Na zkušební těleso se nasadí pryžová nebo latexová buňka. Poté se nasadí plášť ocelové tenkostěnné triaxiální formy a zajistí se ocelovým vrchním nástavcem. Poté se nasadí roznášecí vrchní podložka a celý set se vloží do hydraulického zatěžovacího rámu a nastaví se aktuátor zatížení a posunu do kontaktní polohy s triaxiálním setem. Následně se připojí přívod vzduchu a otevře se ventil do portu buňky, přičemž se musí počkat, dokud není tlak stabilní a na požadované úrovni. Plášťový tlak je zajištěn zvyšováním tlaku vzduchu v pryžové či latexové buňce v rámci 3 monotonických triaxiálních testů. Tyto komorové tlaky jsou zpravidla 50, 100 a 200 kPa. Dostatečný tlak vzduchu je zajištěn vzduchovým kompresorem s manometrem s přesností $\pm 2,5$ kPa. Tlak je kontrolován manometrem umístěným před ventilem buňky. Nastaví se parametry posunu zatěžovacího pístu a zahájí se zkouška. Údaje o síle a posuvu pístu aktuátoru v průběhu testu musejí být ukládány v počítači. Kompletní zkušební set je znázorněn na obrázku 9.



Obrázek 9: Zkušební set

4.4 Vyhodnocení monotonické triaxiální zkoušky

Ze zaznamenaných dat a průběhu zatížení je získána maximální síla při porušení zkušebního vzorku. Z maximální síly při porušení se vypočítá napětí při porušení zkušebního vzorku dle rovnice (4):

$$\sigma_{\text{MAX}} = \frac{P_{\text{MAX}}}{A} \quad (4)$$

kde,

σ_{max} napětí při porušení zkušebního vzorku (kPa)

P_{max} síla při porušení zkušebního vzorku (kN)

A zatěžovací plocha zkušebního vzorku před testem (m^2)

Hlavní axiální napětí je pak definováno jako součet napětí při porušení, napětí od vlastní hmotnosti zkušebního vzorku a komorového hlavního napětí dle rovnice (5).

$$\sigma_1 = \sigma_{\text{MAX}} + \sigma_{\text{vh}} + \sigma_{\text{zd}} \quad (5)$$

kde,

σ_1 hlavní axiální napětí (kPa)

σ_{vh} napětí od vlastní hmotnosti zkušebního vzorku (kPa)

σ_{zd} napětí od zatěžovacího nástavce (kPa)

Dalším krokem je získat smykové parametry, respektive úhel vnitřního tření a hodnotu soudržnosti. Dle Mohr-Coulombovy teorie je (6):

$$\sigma_1 = A\sigma_3 + B \quad (6)$$

kde,

$$A = \frac{1 + \sin(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)} \quad (7)$$

$$B = \frac{2 \cos(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)} \quad (8)$$

Z měřených dat hlavních axiálních napětí a hlavních plášťových napětích jsou pomocí regresní analýzy stanoveny parametry A, B dle rovnic (7) a (8). Následně mohou být stanoveny smykové parametry dle rovnic (9) a (10).

$$\varphi = \sin^{-1} \left(\frac{A-1}{A+1} \right) \quad (9)$$

$$C = \frac{B(1 - \sin \varphi)}{2 \cos \varphi} \quad (10)$$

Tímto jsme získaly obálku Mohrových kružnic, která svírá s osou hlavních normálových napětí úhel vnitřního tření a vytíná na ose hlavních smykových napětí hodnotu soudržnosti pro danou rychlost deformace. Pokud budeme chtít získat pravou soudržnost, tj. soudržnost při rychlosti deformace rovné nule, je nutné provést měření při dvou rychlostech a extrapolovat na nulu.

Výše uvedený výpočet představuje Mohr-Coulombův model pro určení smykových parametrů [Asphalt Academy TG 2, Jenkins a Mulusa 2008, Klobouček a kol. 1979]. Nicméně běžně používaná Mohr-Coulombova metoda není jediný způsob stanovení smykových parametrů.

4.5 Protokol o zkoušce

Protokol o zkoušce musí obsahovat následující údaje (viz tabulka 1)

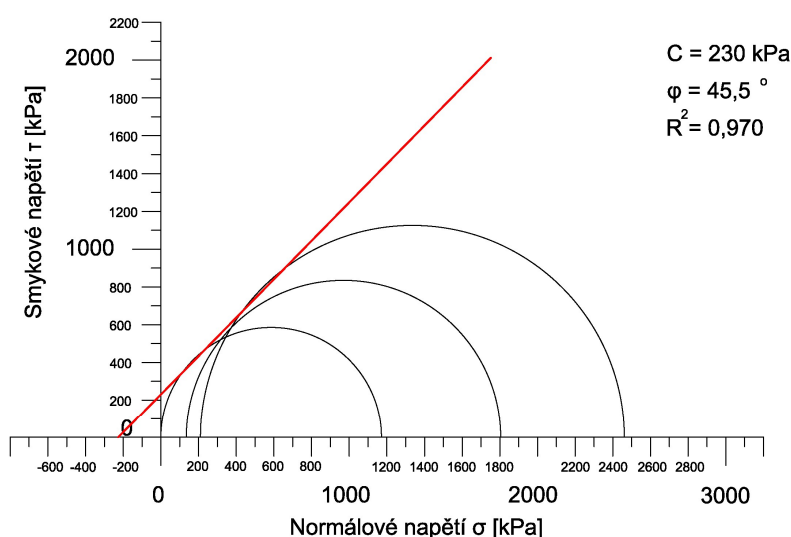
- označení směsi;
- průměrná objemová hmotnost (kg/m^3);
- vlhkost směsi (%);
- číslo vzorku nebo identifikátor;
- hlavní plášťový (boční) tlak (σ_3);
- aplikovaný tlak při porušení (σ_{\max});
- hlavní napětí při porušení (σ_1);
- soudržnost C [kPa];
- úhel vnitřního tření, ϕ [°];
- korelační koeficient, r^2 .

Zaznamenána musí být rovněž teplota zkoušky a rychlost zatížení.

Zkušební vzorek	Plášťový (boční) tlak σ_3 (kPa)	Aplikované napětí při porušení σ_{max} (kPa)	Hlavní axiální napětí při porušení σ_1 (kPa)	Soudržnost C (kPa)	Úhel vnitřního tření ϕ (°)	Korelační koeficient r^2
-						-
Teplota: °C		Rychlost zatížení:			mm/min	

Tabulka 1: Parametry monotonické triaxiální zkoušky uvedené v protokolu

Dále musí být znázorněna obalová křivka Mohrových kružnic, jak je znázorněno na obrázku 10, přičemž středy Mohrových kružnic musí ležet na úsečce $x(\sigma)$, který je dán vztahem $(\sigma_1 + \sigma_3) / 2$. Poloměr kružnic je potom $(\sigma_1 - \sigma_3) / 2$ a úhel vnitřního tření je úhel obalové křivky a osy x. Hodnota soudržnosti je pak dána průsečíkem osy y a obalové křivky Mohrových kružnic.



Obrázek 10: Graf Mohrových kružnic s vyznačenou obalovou křivkou na mezi porušení

5. Shrnutí zkušebního postupu

V rámci této metodiky je popsán stávající stav a výchozí předpoklady pro použití monotonicke triaxiální zkoušky pro hodnocení stmelených směsí či směsí recyklovaných za studena. Hlavním cílem této metodiky je stanovit jednotný postup zkoušení zkušebních vzorků tak, aby byl co nejjednodušší a zároveň co nejjednodušší hodnocen vliv reálného stavu napjatosti stmeleného či stabilizovaného materiálu v podkladních vrstvách vozovek. Nicméně v současnosti lze tento test aplikovat v rámci materiálové klasifikace či v implikaci hledání vlivů jednotlivých vstupů na výsledné vlastnosti a stanovovat jednotlivé závislosti mezi nimi. V současnosti neexistuje v České republice navázání v rámci mechanicko-empirické návrhové metodiky, jako je tomu například v australském předpisu Austroads TG2 – Bitumen stabilised material [Asphalt Academy TG 2], či možnost modelování a predikce chování stmelených či recyklovaných podkladních vrstev vozovek.

Na závěr je nutno zmínit omezení monotonicke triaxiální zkoušky:

- Buňka a ocelový triaxiální set znemožňují vizuální kontrolu v rámci probíhajícího testu.
- Buňka neumožňuje velkou variabilitu velikostí vzorků.
- Latexová membrána vykazuje náchylnost k poškození a opotřebením.
- Ocelový triaxiální set omezuje možnost přesných měření pro dynamické zkoušky (není k tomu ostatně ani zamýšlen).
- Obtížná manipulace se vzorky.
- Potřeba většího množství materiálu.
- Neumožňuje hodnotit skutečné stavy napjatosti v podkladních vrstvách vozovek od pohybujícího se zatížení.

6. Srovnání novosti postupů

Zrnité stmelené (stabilizované) materiály podkladních vrstev vozovky, včetně technologie recyklace za studena se ověřují především pevnostními charakteristikami, kdy se uplatňuje klasická pevnost v prostém tlaku nebo pevnost v příčném tahu. Tyto zkušební postupy jsou jednoduché a rychlé, přičemž jejich výsledkem je pevnostní charakteristika odpovídající způsobu zatížení kompozitního materiálu. Tato skutečnost neodpovídá zcela účinkům, kterým je materiál vystaven v konstrukci vozovky, kdy účinků zatížení může být více. Porovnáme-li tento stav na straně druhé s problematikou zemního tělesa a obecně ověřování chování a stability zemin v takových tělesech, tak zde vedle stanovení poměru únosnosti CBR zpravidla důležitou roli hrají i smykové charakteristiky, které se ne zřídka stanovují různými typy triaxiálních zkoušek. Principy a okrajové podmínky jejich provedení

Ize nalézt v řadě norem, např. ČSN EN ISO 17892-8 pro nekonsolidovanou a neodvodněnou triaxiální zkoušku, ČSN EN ISO 17892-9 pro konsolidovanou triaxiální zkoušku, BS 1377-8 pro provádění triaxiální zkoušky zemin a obdobně ASTM D7181-11, která je platná především v USA a Kanadě. S dynamickou triaxiální zkouškou se lze setkat i v případě asfaltových směsí, kdy je tento postup vymezen normou ČSN EN 12697-25 a v zásadě může být využit jako alternativa k tradičně prováděnému stanovení odolnosti asfaltové směsi proti vzniku trvalé deformace. V podmínkách ČR se však tato zkouška prakticky neprovádí (až na výjimky některých výzkumných úkolů).

Z uvedeného je však patrné, že stávající zkušebnictví a především přístup k charakterizaci stabilizovaných zrnitých směsí silničních staveb, včetně směsí vznikajících recyklací za studena, s triaxiální zkouškou v jakékoli podobě nepracuje a zkoušku nepovažuje za nijak důležitou. Výjimku lze hledat toliko v technických předpisech, které byly v uplynulých 10 letech zavedeny v Jihoafrické republice, kde manuál pro asfaltem stabilizované zrnité materiály vymezuje možnost a dokonce i jistou preferenci při využívání triaxiální zkoušky. Zkouškou se pak získávají parametry, které jsou aplikovány při vlastním dimenzování vozovky, přičemž jsou od roku 2009 vedle zjednodušené triaxiální zkoušky rozvíjeny též postupy pro využití dynamické triaxiální zkoušky. Zjednodušená triaxiální zkouška se stala základem postupu, který vymezuje tato metodika při definování monotonické triaxiální zkoušky. Novost lze spatřovat především v ověření a nastavení zkušební postupu na podmínky platné v ČR a to včetně postupného zpřesnění okrajových podmínek vlastní zkoušky. Z obecného hlediska zcela nová tato zkouška v mezinárodním měřítku není. Tuto skutečnost je třeba stvrdit i skutečností, že vlastní triaxiální komora byla vytvořena ve spolupráci se společností WIRTGEN, která se inspirovala právě principy zjednodušené triaxiální zkoušky, jak je prováděna v Jihoafrické republice. Zcela novým aspektem naopak je použití pryžové buňky namísto latexové. Od této úpravy se očekává z praktického hlediska delší životnost použitého přípravku, což by v praxi mělo vést k dílčímu snížení nákladů spojených s provedením vlastní zkoušky.

7. Popis uplatnění certifikované metodiky

V českých národních normách ani v evropských normách EN v současnosti není zavedena adekvátní metoda pro stanovení smykových parametrů stmelených či stabilizovaných zrnitých směsí uplatňovaných v konstrukčních vrstvách vozovek. Existují triaxiální zkoušky pro zeminy či asfaltové směsi, ty se však provádějí na menších zkušebních tělesech a s jinými okrajovými podmínkami. Nezohledňují také zpravidla větší zrnitost, kterou se vyznačují stabilizované zrnité směsi a to včetně směsí recyklace za studena.

Problematika směsí recyklace za studena je potom upravena v technických podmínkách TP 208, přičemž se zde jako kvalitativní ukazatele sledují pouze pevnost (v tlaku nebo v příčném tahu), odolnost proti účinkům vody (nebo kombinovanému účinku vody a mrazu), jakož i mezerovitost a stanovení optimální vlhkosti modifikovanou Proctorovou zkouškou. Žádný z těchto parametrů adekvátně nemůže nahradit smykové parametry.

Tato metodika z hlediska možností provádění rychlé a zjednodušené triaxiální zkoušky vyplňuje existující absenci, která v technických předpisech je. Jejím zavedením by mělo být umožněno, aby zkušební laboratoře prováděly zkoušky monotonické triaxiální zkoušky jednotně při shodných okrajových podmínkách a vstupních parametrech a to s využitím k tomu určenému a metodikou definovanému zkušebnímu zařízení a nezbytných pomůcek. Veřejným zadavatelům, včetně Ministerstva dopravy či Ředitelství silnic a dálnic metodika bude umožňovat smykové parametry sledovat. V současnosti přitom nelze předpokládat, že se tyto parametry stanou normativem požadovaným jako dokládáným technický parametr u stabilizovaných či jinak stmelených zrnitých materiálů. Může se jednat však o doporučený zkušební postup či zkušební postup, který se využije k postupnému sběru potřebných dat, aby bylo možno v průběhu rozumně zvoleného monitorovacího období nastavit případně vhodné mezní požadavky na smykové parametry.

Z mezinárodního hlediska zavedení metodiky umožní sdílet získaná měření a případně prosazovat postupně zavádění takové metody do širšího evropského kontextu.

8. Ekonomické aspekty

Metodika vymezuje principy a způsob provedení triaxiální zkoušky u zrnitých stmelených a stabilizovaných směsí, tedy u materiálů, kde maximální velikost zrna může dosazovat u zkušebního tělesa až 32 mm. Její provedení není významně časově náročnější v porovnání s tradičním stanovením pevnostních charakteristik stmelených či stabilizovaných směsí, včetně směsí recyklace za studena. Pro zkušební laboratoř však znamená, že musí být vybavena vhodným zkušebním rámem (testovacím lisem), který musí být uzpůsoben především velikosti zkušebního vzorku, jehož výška je zpravidla 300 mm. Dále musí být zkušební laboratoř vybavena speciální ocelovou formou, která má pryžovou či latexovou buňku pro regulaci komorového tlaku. Tato buňka je opatřena ventilem, kterým dochází k jejímu natlakování a udržování požadovaného komorového tlaku. S ohledem k této skutečnosti, jakož i k působení osového tlaku lisu, musí být forma dostatečně robustní. Lze předpokládat, že cena vlastní ocelové triaxiální formy pro umístění zkušebního tělesa včetně pryžové či latexové buňky bude na úrovni 30.000 až 40.000 CZK. Pryžová bude dražší, avšak bude mít delší životnost. Naopak u latexové buňky dle zkušenosti dochází k jejímu rychlejšímu opotřebení a musí se buď vhodně odborně opravit, nebo vyměnit. Pokud

laboratoř není vybavena zkušebním rámem, potom jeho pořízení – zpravidla je vhodnější hydraulický rám – představuje náklad ve výši alespoň 1 mil. CZK.

Pro přípravu zkušebních těles je potřeba mít k dispozici upravenou formu, která se používá běžně pro výrobu zkušebních těles směsí recyklace za studena. Těmi je řada zkušebních laboratoří i v ČR vybavena. Forma pro výrobu zkušebního tělesa monotonicke triaxiální zkoušky zjednodušeně je tvořena spojením 3 forem používaných pro standardní zkušební tělesa zkoušky pevnosti v příčném tahu směsí recyklace za studena. Tudíž i její pořizovací cena bude přibližně trojnásobná. Hutnění lze provádět stejným ručním lisem, který je využíván in-situ pro zkušební tělesa směsí recyklace za studena, jak se vyrábějí pro zkoušky dle TP 208. Je však potřebné pro upevnění formy pro hutnění zkušebních těles mít upravený stojan, jehož cena bude cca 3.000 CZK.

Celkově bude cena monotonicke triaxiální zkoušky vyšší v porovnání s klasickým provedením zkoušky pevnosti v příčném tahu. Důvodem je jednak zařízení, které je pro vlastní zkoušku potřebné, jednak náročnější manipulace se vzorkem. Tato skutečnost je ale dostatečně vyvážena získáním smykových parametrů, které lépe charakterizují chování stmelené či stabilizované směsi v konstrukci vozovky. Cena jedné zkoušky se bude pohybovat na úrovni 15.000 až 20.000 CZK.

9. Literatura

Čížková, Z., Šedina, J., Valentin, J., Engels, M.: Laboratory experience with the application of monotonic triaxial test on the cold recycled asphalt mixes, In: Proceedings of 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress, 1st - 3rd June 2016. Prague: Czech Technical University, 2016. ISBN 978-80-01-05962-3.

Jenkins K. J. Mulusa, W. K.: Updating Bituminous Stabilized Materials Guidelines: Mix Design Report, Phase II – Appendix B, Technical Memorandum, South Africa 2008.

Jenkins, K. J.: Determination of Triaxial Shear Parameters Using Simple Triaxial Test, Method 7, South Africa, 2009.

Jenkins, K. J., Robroch, S., Henderson, M.G., Wilkinson, J. and Molenaar, A.A.A.: Advanced Testing for Cold Recycling Treatment Selection on N7 Near Cape Town, 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA'04), ISBN: 1-920-01718-6, 2004.

Jenkins, K. J.: Mix Design Considerations for Cold and Half-Warm Bituminous Mixes with Emphasis on Foamed Bitumen, Ph.D. thesis, University of Stellenbosch, Stellenbosch, South Africa, 1999.

Long, F., Ventura, D. G. C.: Laboratory Testing for the HVS Test Sections on the N7 (TR11/1), Confidential Contract Report CR-2003/56, 2004.

Wirtgen GmbH: Wirtgen Manual on Cold Recycling Technology, Germany, 2012.

Ministerstvo dopravy ČR: TP 208 - recyklace konstrukčních vrstev netuhých vozovek za studena, technické podmínky, Praha, 2009.

Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials, TG2 Second Edition, Asphalt Academy, Pretoria 2009.

Klobouček B., Kaun M., Luxemburk F., Procházka M., Stahl J.: Silniční laboratoř, SNTL, Praha 1979

Tingyu Wu, Yuanqiang Cai, Lin Guo, Daosheng Ling, Jun Wang: Influence of shear stress level on cyclic deformation behaviour of intact Wenzhou soft clay under traffic loading, Engineering Geology, Volume 228, 2017, Pages 61-70, ISSN 0013-7952.

Eghbali, A., Fakharian, K.: Effect of Principal Stress Rotation in Cement-Treated Sands Using Triaxial and Simple Shear Tests. International Journal of Civil Engineering. Vol. 12. 1-14, 2014.

Vlastní publikace s návazností na řešenou problematiku

Šedina, J., Suda, J., Valentin, J.: Standardní a mikromleté fluidní popílky ve stmelěných směsích pro podkladní vrstvy. In: Podkladní vrstvy a podloží vozovek. Brno, 2016-11-22. Praha 4: PRAGOPROJEKT,a.s., 2016. s. 45-52. ISBN 978-80-903925-8-8.

Šedina, J., Čížková, Z., Valentin, J.: Využití triaxiálního přístroje pro posouzení cementem zlepšených zemin a asfaltových směsí recyklace za studena. In: Juniorstav 2016, sborník abstraktů. JUNIORSTAV 2016, 18. odborná konference doktorského studia, Brno, 2016-01-28. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2016. ISBN 978-80-214-5311-1.

Čížková, Z. et al.: Laboratory experience with the application of monotonic triaxial test on the cold recycled asphalt mixes. In: Proceedings of 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress, 1st - 3rd June 2016. 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Praha, 2016-06-01/2016-06-03. Prague: Czech Technical University, 2016. ISBN 978-80-01-05962-3. DOI 10.14311/EE.2016.220

Čížková, Z. et al.: Poznatky z využití monotónní triaxiální zkoušky u asfaltových směsí recyklovaných za studena. Silniční obzor. 2016, 77(2), 36-42. ISSN 0322-7154.

Valentin, J.; Čížková, Z.; Suda, J.; Mollenauer, K.; Engels, M.; Bátista, F.; McNally, C.: Introduction to European COREPASOL Project on Harmonizing Cold Recycling Pavement Techniques In: Materials and Infrastructures 2. New York: John Wiley & Sons, 2016. p. 1-17. Wiley-ISTE. vol. 5B. ISBN 9781119318613.